

EPISTEMOLOGISCHE ASPEKTE DER NEUEN ENTWICKLUNGEN IN DER PHYSIK

Gernot Münster

II. Institut für Theoretische Physik der
Universität Hamburg
Luruper Chaussee 149, 2000 Hamburg 50

I. EINLEITUNG

Die Physik ist die Fortsetzung der Philosophie mit anderen Mitteln.
Arnold Hau

Hier in Heidelberg an einem Arbeitskreis über Physik und Philosophie teilzunehmen, ist mir eine große Freude. Daß Heidelberg ein guter Ort für die Philosophie ist, zeigt sich schon darin, daß der Philosophenweg dem Wanderer erlaubt, einen Aufstieg und anschließenden Abstieg zu vollziehen. Dies ist nicht notwendig so. In Jever etwa ist der Philosophenweg eine gut beschilderte Sackgasse.

Herr Stamatescu hat mir vorgeschlagen, über Aspekte der neuen Entwicklungen in der Physik zu sprechen, die für naturphilosophische bzw. erkenntnistheoretische Fragestellungen bedeutend sein könnten. Als Physiker fühle ich mich natürlich nicht berufen, die Arbeit eines Philosophen zu leisten, und die betreffenden Aspekte einer naturphilosophischen Diskussion zu unterziehen. Ich werde daher die Themen aus der Sichtweise des Physikers betrachten und versuchen, den Finger auf diejenigen Stellen zu legen, die meiner Meinung nach Ansatzpunkte für naturphilosophische Überlegungen darstellen.

Zunächst möchte ich die Thematik etwas eingrenzen. Die neuere Physik, über die ich spreche, ist auf dem Boden der Quantentheorie angesiedelt. Fragen aus dem Problemkreis der Grundlagen und der Interpretation der Quantentheorie (Einstein-Podolsky-Rosen, Meßprozeß, Bellsche Ungleichungen etc.), wie wir sie gestern erörtert haben, gehören zweifellos zu den wichtigsten physikalischen Themen von philosophischer Bedeutung. Hierüber werde ich jedoch nichts sagen, da sie nicht spezifisch für die neueren Entwicklungen sind, sondern schon in der nichtrelativistischen Quantenmechanik auftreten. Stattdessen wird sich das Gespräch überwiegend um diejenigen Entwicklungen drehen, deren zentrales Thema die Vereinheitlichung der fundamentalen

⁰Beitrag zum Arbeitskreis „Physik und Philosophie“, FEST Heidelberg, Juni 1989

Naturgesetze ist. Die Bestrebungen zur Vereinheitlichung bringen Gesichtspunkte mit sich, die für naturphilosophische Untersuchungen geeignet sind, und zwar sowohl in ontologischer als auch in methodologischer Hinsicht. In den Mittelpunkt des Interesses möchte ich speziell die Wandlung des Raumbegriffes stellen, wie er in den zu nennenden Theorien stattfindet.

II. DIE ENTWICKLUNG DER NEUEREN THEORIEN ZUR BESCHREIBUNG DER KONSTITUENTEN DER MATERIE UND IHRER WECHSELWIRKUNGEN

Ubi materia, ibi geometria
J. Kepler

II.1. Das Standard-Modell

Der anerkannte Rahmen für die Beschreibung wechselwirkender Teilchen ist die relativistische Quantenfeldtheorie. In den sechziger und frühen siebziger Jahren lag bereits eine Fülle experimenteller Daten über die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen vor. Jedoch gelang es nicht, Theorien zu formulieren, die diese in zufriedenstellender Weise beschrieben. Der Durchbruch kam in den siebziger Jahren mit dem Aufgreifen der Eichfeldtheorien (Yang-Mills-Theorien). Das wesentliche Merkmal der Eichfeldtheorien ist ihre besonders hohe Symmetrie. Die Theorie läßt sogenannte lokale Symmetrietransformationen zu, die für jeden Raum-Zeit-Punkt unabhängig gewählt werden können. Die Symmetriegruppe ist unendlich-dimensional und sprengt den Rahmen des klassischen Symmetriebegriffes, der nur starre Symmetrie-Operationen kannte.

Das Standard-Modell beinhaltet drei Generationen von Konstituenten der Materie. Jede dieser Generationen umfaßt zwei Arten von „quarks“ und zwei Leptonen (z.B. Elektron und Neutrino). Die Wechselwirkungen der Konstituenten werden durch Eichfelder vermittelt, die zur lokalen Eichgruppe $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ gehören. Die drei Faktoren repräsentieren die starken, die schwachen und die elektromagnetischen Wechselwirkungen. Die Gravitation bleibt dabei zunächst unberücksichtigt.

Das Standard-Modell der Elementarteilchentheorie kann mit Recht als eine Perle der theoretischen Physik bezeichnet werden. Seine Voraussagen stehen in hervorragender Übereinstimmung mit dem derzeitigen experimentell gewonnenen Wissen. Darüber hinaus befriedigt es die theoretischen Anforderungen, die man an eine konsistente Quantenfeldtheorie stellt.

Das Standard-Modell bringt einen ontologischen Aspekt mit sich, den ich an dieser Stelle kurz ansprechen möchte. In der älteren Quantenfeldtheorie hat man den Elementarteilchen jeweils entsprechende elementare Felder zugeordnet. Diese Korrespondenz ist im Standard-Modell aufgehoben. In ihm sind die quarks, bzw. quark-Felder elementare theoretische Entitäten. Quarks aber sind keine Teilchen, weder im phänomenologischen noch im quantentheoretischen Sinne, da sie nicht als isolierbare Partikel bzw. Zustände im physikalischen Hilbertraum auftreten. Die physikalischen Teilchen andererseits sind als gebundene Zustände aus

quarks zusammengesetzt zu denken. Den elementaren Größen der Theorie entsprechen also keine physikalischen Objekte.

Hier muß ich allerdings hinzufügen, daß dieser Sachverhalt nicht grundsätzlicher Natur ist. Die Formulierung der Theorie mittels quarks erweist sich als einfach; quarks sind Größen mit besonderem Symmetrie-Verhalten bezüglich der Eichtransformationen. Eine Formulierung mittels physikalischer Teilchen wäre jedoch prinzipiell ebenfalls möglich, wenn auch in der Praxis nicht durchführbar. Der Formalismus wäre erheblich komplizierter und es ist fraglich, ob die entsprechenden Gleichungen sich überhaupt aufstellen oder handhaben ließen.

Ich möchte nun auf den Raumbegriff im Rahmen des Standard-Modells zu sprechen kommen. Mit der Bezeichnung Raum ist dabei i.a. das Raum-Zeit-Kontinuum gemeint.

1. Das vier-dimensionale Raum-Zeit-Kontinuum geht in das Standard-Modell als zugrundeliegender Schauplatz des Geschehens ein. Die Felder sind Funktionen, die von den Koordinaten der Raumpunkte abhängen. Andererseits aber ist die Vorstellung eines Kontinuums im Rahmen der Physik natürlich fraglich. Die Festlegung von Orten geschieht ja immer durch Messungen mit intrinsischen endlichen Ungenauigkeiten. Raum im operationalen Sinne wäre durch die Möglichkeit bestimmt, lokalisierte Messungen durchzuführen. Lokalisierbarkeit wiederum ist aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation durch den zur Verfügung stehenden Aufwand an Energie begrenzt.

In der Tat spiegelt sich dies im Standard-Modell wieder, das durch eine sogenannte renormierbare Feldtheorie beschrieben wird. Renormierbare Feldtheorien weisen bei ihrer Konstruktion Probleme auf, die mit dem Verhalten bei kurzen Abständen zusammenhängen. Um scheinbare Singularitäten zu vermeiden ist man gezwungen, die Theorie zunächst so zu formulieren, daß eine effektive kleinste Länge auftritt. Das kann z.B. durch die Einführung eines Gitters geschehen, wie Herr Müller in seinem Vortrag erläutert hat. Das Problem der Konstruktion der Theorie besteht dann im Auffinden des Grenzprozesses, bei dem die kleinste Länge gegen Null strebt, während Observable endlich bleiben. Die Existenz und die Durchführung eines solchen Limes sind wesentlich mit der Dynamik der Theorie verknüpft. Auf diese Weise findet das Problem des Kontinuums seinen Eingang in die mathematische Beschreibung der Elementarteilchen und steht mit der Natur der Wechselwirkung in Zusammenhang.

Der Hinweis scheint mir gerechtfertigt, daß eine gewisse Analogie zum Problem des Kontinuums in der Mathematik festzustellen ist. Dieses Thema würde aber eine eigene Abhandlung erfordern, die ins Detail zu gehen hätte und hier gewiß nicht am Platze wäre.

2. Der Raum im Standard-Modell ist der flache Minkowski-Raum ohne eigene Dynamik. Diese wäre erst bei einer Einbeziehung der Gravitation zu berücksichtigen und würde die differentialgeometrische Behandlung eines gekrümmten Raumes verlangen.

Jedoch spielt die Differentialgeometrie bereits auf andere Weise eine Rolle in den Eichtheorien. Es zeigt sich nämlich, daß sich die Eichtheorien mathematisch besonders angemessen im Formalismus der sogenannten Faserräume bzw. Faserbündel darstellen lassen. Diese Faserräume sind höher-dimensionale Räume, welche aus dem Minkowski-Raum und einem „inneren“ Raum,

der Träger weiterer Eigenschaften der Felder ist, zusammengesetzt sind. Die Differentialgeometrie solcher Räume ist der natürliche Rahmen zur Formulierung von Eichtheorien. Diesen Sachverhalt kann man als eine „Geometrisierung“ der Physik betrachten. Zur Allgemeinen Relativitätstheorie, die ja eine geometrische Theorie der Gravitation ist, gibt es verschiedene Parallelen. So wird die Rolle, die die Krümmung des Raumes in der Allgemeinen Relativitätstheorie spielt, von den Feldstärken in den Eichtheorien übernommen. Andererseits kann auch die Allgemeine Relativitätstheorie als Eichtheorie formuliert werden.

In den Faserräumen, die in so natürlicher Weise in Eichtheorien auftreten, finden wir bereits eine sinnvolle Verallgemeinerung des Raumbegriffes. Jedoch sind die obengenannten inneren Räume noch nicht sehr mit dem Minkowski-Raum verwoben und stehen im Formalismus nicht auf gleichem Fuß mit ihm.

Ich möchte nun mit der Besprechung der physikalischen Theorien weiter fortfahren. Trotz seiner großartigen Erfolge weist das Standard-Modell eine Reihe von Schönheitsfehlern auf. Es gibt in ihm etwa 20 freie Parameter, die phänomenologisch angepaßt werden müssen. Dieses große Maß an Kontingenz erscheint vielen Physikern als unbefriedigend. Die Zahl der quark-Lepton-Generationen ist ebenfalls nicht durch das Modell fixiert. Weiterhin gibt es auffällige Relationen zwischen Eigenschaften von quarks und Leptonen, die das Standard-Modell nicht erklärt. Andererseits postuliert das Standard-Modell ein hypothetisches Teilchen, das Higgs-Boson, das aus Gründen der Konsistenz vorhanden sein soll, bis jetzt aber noch nicht beobachtet wurde. Dieses Teilchen fügt sich nicht recht in das Schema der übrigen Konstituenten und fristet sein spekulatives Dasein als eine Art häßliches Entlein der Theorie. Diese Probleme des Modells sind metatheoretischer Natur. Daneben steht noch als weiteres Problem die völlige Nichtberücksichtigung der Gravitation, die sich den Versuchen einer quantentheoretischen Behandlung hartnäckig widersetzt.

II.2. Ansätze zur Vereinheitlichung

Hätte mich der liebe Gott bei der Schöpfung des Weltalls herangezogen, so hätte ich ihm größere Einfachheit empfohlen.

König Alfons von Kastilien über das ptolemäische System

Die genannten Probleme des Standard-Modells haben die Theoretiker dazu gebracht, über umfassendere Theorien nachzudenken. Da es bis heute keine unmittelbaren experimentellen Hinweise auf neue Elementarteilchen-Physik jenseits des Standard-Modells gibt, sind diese Versuche notwendig spekulativer Natur.

2.1. „Vereinheitlichte Theorien“ der Wechselwirkungen

Die starken, schwachen und elektro-magnetischen Wechselwirkungen sind im Standard-Modell noch nicht wirklich vereinigt, wie die Produktstruktur der Eichgruppe anzeigt. In den Ansätzen zur Vereinheitlichung („Grand Unification“) versucht man, diese Wechselwirkungen auf eine fundamentale Wechselwirkung zurückzuführen, die bei hohen Energien zu-

tage treten sollte. Mathematisch drückt sich dies in Form einer einfachen Lie-Gruppe, z.B. $G = SU(5), SO(10)$ o.ä. aus. Die betrachteten Modelle weisen eine geringere Zahl freier Parameter auf. Außerdem sind sie in der Lage, die genannten quark-Lepton-Beziehungen zu erklären. Es gibt aber nach wie vor eine Reihe von Problemen. Die Zahl der Generationen bleibt unbestimmt. Es tritt eine Hierarchie von Energieskalen, insbesondere der Vereinigungsenergie E_G und der schwachen Energieskala E_{weak} auf, deren Zahlenverhältnis $E_G/E_{\text{weak}} = 10^{13}$ nicht auf natürliche Weise erklärt wird. Die einfachsten Theorien der Vereinheitlichung sagen den Zerfall des Protons voraus mit einer Halbwertszeit, die experimentell falsifiziert wurde. Auch das Massenverhältnis einiger quarks wird falsch vorausgesagt. Diese Defekte sind nur durch komplizierte Modifikationen zu beheben.

2.2. Supersymmetrie

Supersymmetrie ist eine neuartige Form von Symmetrie, die Fermionen und Bosonen miteinander in Beziehung setzt, wozu herkömmliche Symmetrien nicht in der Lage sind. Da die Konstituenten der Materie i.a. Fermionen und die Vermittler der Wechselwirkungen Bosonen sind, könnte die Supersymmetrie eine Verbindung zwischen ihnen herstellen. Aber auch rein mathematisch besitzt die Supersymmetrie für etliche Theoretiker eine Attraktivität, die in ihrer formalen Struktur begründet ist.

Zahlreiche supersymmetrische Theorien sind formuliert und studiert worden. Als physikalisches Argument zugunsten der Supersymmetrie wird ihre potentielle Fähigkeit, das oben genannte Hierarchie-Problem zu lösen, angeführt. Eine spezielle Variante, die Supergravitation, schließt sogar die Schwerkraft mit ein, und wurde als Weg zur Quantisierung der Allgemeinen Relativitätstheorie betrachtet.

Schwerwiegender Mangel der supersymmetrischen Modelle ist die Tatsache, daß es bislang keinerlei experimentelle Hinweise auf Supersymmetrie in der Teilchenphysik gibt.

2.3. Höhere Dimensionen

*Und zieht als freier Musensohn
in die Poetendimension,
die fünfte, da die vierte jetzt
von Geistern ohnehin besetzt.*

Wilhelm Busch¹

a) Kaluza-Klein-Theorien

Auf älteren Arbeiten von Kaluza und Klein basiert die Idee, durch eine Erweiterung der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie eine Vereinigung von Schwerkraft und anderen Wechselwirkungen herbeizuführen. Dazu betrachtet man die Allgemeine Relativitätstheorie in einem Raum-Zeit-Kontinuum von $d > 4$ Dimensionen. Nun sucht man nach Lösungen, bei

¹frei nach Balduin Bählamm, dem verhinderten Dichter, in: E. Mielke, Naturwissenschaften 72 (1985) 118

denen vier Dimensionen ausgedehnt bleiben, während die überzähligen $d - 4$ Dimensionen kompaktifiziert, d.h. zu einem Raum von mikroskopisch kleinem Durchmesser aufgerollt sind. Die Situation ist analog zu derjenigen einer Fläche, die in einer Richtung zu einer schmalen Rolle gedreht wird. Es stellt sich dann heraus, daß die auf vier effektive Dimensionen reduzierte Theorie die Gravitation und zusätzliche Eichfelder beschreibt.

In den ursprünglichen Arbeiten von Kaluza und Klein war $d = 5$ und die Zerlegung der fünf-dimensionalen Metrik in der Form

$$(g_{ab}) = \left(\begin{array}{c|c} g_{\mu\nu} + \phi A_\mu A_\nu & \phi A_\mu \\ \hline \phi A_\nu & \phi \end{array} \right)$$

definiert eine vier-dimensionale Metrik $g_{\mu\nu}$ sowie ein Eichfeld, nämlich das Vektorpotential A_μ , und zusätzlich ein Skalarfeld ϕ . Ist die fünf-dimensionale Mannigfaltigkeit in der fünften Richtung zu einem Kreis vom Durchmesser der Planckschen Länge $L = 10^{-33}$ cm aufgerollt, so findet man in den verbleibenden vier ausgedehnten Dimensionen, daß die Felder $g_{\mu\nu}$ und A_μ bei Abständen, die genügend groß gegenüber L sind, den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie und Elektrodynamik genügen.

Indem man noch mehr Dimensionen zuläßt, nämlich mindestens 11, kann man auch die starken und schwachen Wechselwirkungen in diesem Schema unterbringen.

In den Kaluza-Klein-Theorien hat der Raumbegriff eine weitere Verallgemeinerung erfahren. Während die zusätzlichen Dimensionen im Falle der früher genannten Faserräume zu einem „Quasi-Raum“ gehörten, dessen Eigenschaften noch verschieden von denen des vier-dimensionalen Raumes waren, bildet nun die höher-dimensionale Mannigfaltigkeit ein einheitliches Gebilde. Auf der fundamentalen Ebene der theoretischen Beschreibung gehen alle Dimensionen gleichberechtigt ein. Erst durch die Lösung der Feldgleichungen, bei der einige Dimensionen kompaktifiziert sind, werden die vier Dimensionen ausgezeichnet, die die Rolle der Raum-Zeit spielen.

Das Geschehen in den vier Dimensionen ist der Beobachtung in der üblichen Weise zugänglich. Die höheren Dimensionen lassen sich indirekt feststellen, indem ihre Anwesenheit sich bei Prozessen sehr hoher Energie bzw. bei sehr kurzen Abständen bemerkbar macht. Da es sich bei den höheren Dimensionen um ein theoretisches Konstrukt handelt, stellt sich die Frage: in welchem Sinne existiert dieser Raum?

b) Neuere Kaluza-Klein-Theorien

Ein Problem im Zusammenhang mit der Beschreibung der Konstituenten innerhalb von Kaluza-Klein-Theorien hat dazu geführt, daß die obige Konstruktion modifiziert wurde. Die Tatsache, daß es in vier Dimensionen chirale Fermionen (z.B. linkshändige Neutrinos) gibt, erfordert eine gerade Zahl von zusätzlichen Dimensionen und insbesondere das Vorhandensein von primären, d.h. nicht abgeleiteten Eichfeldern bereits in der höher-dimensionalen Theorie. Dies bedeutet, daß im Gegensatz zur ursprünglichen Idee der Kaluza-Klein-Theorien nicht alle Eichfelder einer höher-dimensionalen Gravitation entspringen können. Ein Beispiel für eine

solche Theorie ist die sogenannte zehn-dimensionale Super-Gravitation. In ihr finden sich Supersymmetrie, Vereinheitlichung und höhere Dimensionen realisiert.

Auch diese neueren Kaluza-Klein-Theorien sind mit Problemen behaftet. Die Quantisierung dieser Theorien ist fraglich. Sie sind nicht renormierbar im üblichen Sinne. Dies Problem wäre behoben, wenn sie stattdessen endlich, also ohne Divergenzen wären, wie man eine Zeit lang glaubte. Dies scheint sich aber nicht bewahrheitet zu haben. Ein weiteres Problem ist darin zu sehen, daß die Kompaktifizierung der höheren Dimensionen bis jetzt ad hoc eingeführt wird, während sie sich eigentlich dynamisch aus der Theorie selbst ergeben sollte. Dies Problem ist aber eher ein solches unserer Unkenntnis der Mechanismen. Besondere Aufmerksamkeit hat das Auftreten von sogenannten Anomalien auf sich gelenkt. Dies sind quantentheoretische Effekte, die die Gültigkeit einiger unverzichtbarer Erhaltungssätze, wie dem der elektrischen Ladung, verletzen würden. Green und Schwarz entdeckten 1984 einen Mechanismus zur Vermeidung von Anomalien. Dieser ist auf natürliche Weise in String-Theorien wirksam und hat zu dem großen Interesse an diesen Theorien, die ich weiter unten besprechen möchte, Anlaß gegeben.

2.4. Quantengravitation

The quantum fluctuations in the geometry are inescapable, if one is to believe the quantum principle and Einstein's theory.

C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler

Unabhängig von den oben skizzierten Ansätzen gibt es verschiedenartige Versuche, die klassische Theorie der Gravitation, namentlich die Allgemeine Relativitätstheorie, in den Rahmen der Quantentheorie einzufügen. Diese Versuche entspringen nicht einer phänomenologischen Notwendigkeit sondern dem Wunsch nach einer konsistenten quantentheoretischen Beschreibung der gesamten Physik. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sind einerseits mehr technischer Natur. Insbesondere sieht man sich mit der Nicht-Renormierbarkeit der Theorie konfrontiert. Andererseits aber gilt es, eine Reihe von konzeptuellen Fragen zu lösen. In der Allgemeinen Relativitätstheorie bietet der Raum bekanntlich nicht mehr nur die passive Bühne für das physikalische Geschehen sondern hat aktiv an der Dynamik teil und ist Träger eigener Freiheitsgrade. In der Quantentheorie sind diese als Observable aufzufassen, denen keine scharfen Werte zukommen, sondern die mit charakteristischen Unschärfen behaftet sind. Damit geht eine Auflösung von Begriffen der Geometrie wie Ort und Abstand einher, die keine scharfe Bedeutung mehr haben können. Die geometrischen Begriffe bedürfen also in einer Quantentheorie der Gravitation dringend einer neuen Interpretation, um dieser Einsicht gerecht zu werden. Diese Neubestimmung des Raumbegriffes sollte insbesondere bei sehr kleinen Abständen von der Größenordnung der Planckschen Länge L wichtig werden. Man nimmt an, daß in diesen Bereichen quantenartige Fluktuationen von Geometrie und Topologie auftreten, die eine sinnvolle Verwendung des klassischen Raumbegriffes unmöglich machen.

Weiterhin ist die Interpretation der Wellenfunktion des Universums, die in diesem Zusammenhang auftritt, kontrovers und Gegenstand zahlreicher Studien.

Auch bei theoretischen Untersuchungen zum Ursprung des Universums spielen innerhalb von kosmologischen Modellen Überlegungen zur Quantengravitation eine Rolle. Beispielsweise haben Vilenkin, Hawking u.a. Ansätze formuliert, den Ursprung des Weltalls als Quantensprung aus einem Zustand der Abwesenheit von Raum und Materie in denjenigen eines primordialen Kosmos aufzufassen.

2.5. Superstrings

Als vorläufig letzte Etappe in diesem Sturmloch durch neuere Theorien der Physik möchte ich die Superstrings nennen. Mit ihnen erreichen wir gleichzeitig den Höhepunkt des Spekulativen, der ihnen auch die Kritik mancher mehr bodenständiger Physiker eingetragen hat.

Superstring-Theorien sind seit den siebziger Jahren bekannt. Ihre außerordentliche Popularität in den letzten Jahren verdanken sie jedoch der Entdeckung von Green und Schwarz (1984), daß sie in der Lage sind, auf natürliche Weise Inkonsistenzen zu vermeiden, mit denen andere Theorien geplagt sind.

Die einfachste String-Theorie, diejenige des sogenannten bosonischen Strings, beschreibt die Dynamik einer idealisierten, unendlich dünnen Saite (Faden). Überraschenderweise stellt sich heraus, daß eine Quantisierung nur widerspruchsfrei durchführbar ist, wenn die Zahl der Raum-Zeit-Dimensionen $d = 26$ ist. In den Superstring-Theorien besitzt die Saite weitere innere Freiheitsgrade von fermionischer Natur, durch die eine Supersymmetrie realisiert wird. In diesem Falle hat man $d = 10$. Die Reduzierung der Dimensionen zu der uns gewohnten Zahl von vier hat wie im oben beschriebenen Falle der Kaluza-Klein-Theorien zu geschehen.

Die Eigenschaften der Superstring-Theorie, welche sie für ihre Anhänger so anziehend gemacht haben, sind die folgenden. Eine Superstring-Theorie enthält notwendig die Gravitation. Während man Mühe hatte, diese in anderen Theorien unterzubringen, wird sie hier zwingend gefordert. Weitere Eichfelder kommen in den meisten Superstring-Theorien ebenfalls vor. Die Frage der Endlichkeit sieht hoffnungsvoll aus. Die bisherigen Rechnungen lassen vermuten, daß keine Divergenzen auftreten, so daß sich das Problem der Nicht-Renormierbarkeit nicht stellen würde. Die Superstring-Theorien zeigen eine in hohem Maße reiche mathematische Struktur, in der Elemente aus Geometrie, Topologie, Analysis, Zahlentheorie, Kombinatorik und Gruppentheorie auf neuartige Weise zueinander in Beziehung gesetzt werden, die sie sogar für reine Mathematiker interessant werden lassen.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der noch 1985 sehr betont wurde, war die Eindeutigkeit der Superstring-Theorien. Es schien so, daß die Zahl der Dimensionen ($d = 10$), die Eichgruppe G und die vorkommenden Konstituenten im wesentlichen festgelegt wären, und daß es auch keine freien Parameter gäbe. Im Lichte neuer Entwicklungen hat sich diese Auffassung aber nicht bestätigt. Es wurden Verfahren gefunden, die es gestatten, in weniger als zehn Dimensionen eine große Zahl von String-Theorien zu konstruieren, die sich in zahlreichen Merkmalen voneinander unterscheiden. Damit ist die Eindeutigkeit vorerst verloren gegangen. Die große Zahl neuer Modelle steht in engem Zusammenhang mit der Möglichkeit, die Kompaktifizierung

zu vier Dimensionen auf viele verschiedene Arten durchzuführen. Sie können als verschiedene Grundzustände der String-Theorie aufgefaßt werden.

Ich möchte nun einige Bemerkungen zur String-Theorie anschließen, die wichtig für die Frage des Raumes sind. In der ursprünglichen Theorie war der Ausgangspunkt eine Saite, die sich in einem vorgegebenen Raum mit eventuellen weiteren anwesenden Kraftfeldern bewegt. Oberflächlich scheint eine klare Trennung von String einerseits und Hintergrundfeldern, wie z.B. der räumlichen Metrik, andererseits vorzuliegen. Es zeigt sich jedoch dann in der Theorie, daß die Freiheitsgrade der Hintergrundfelder mit Freiheitsgraden der Strings zu identifizieren sind. Zum Beispiel gibt es gewisse Anregungszustände von Strings, welche als Gravitonen in Erscheinung treten und die Schwerkraft vermitteln. Dem wird im Formalismus der String-Felder Rechnung getragen, wo die Freiheitsgrade der Strings und der Hintergrundfelder zu einem einheitlichen Gebilde miteinander verschmelzen. Die vorliegende Raum-Struktur, d.h. die Zahl der Dimensionen, die Topologie, Metrik und Art der Kompaktifizierung höherer Dimensionen, resultiert aus dem Grundzustand, in dem sich das System gerade befindet. Darüber hinaus sind diese Größen mit Quantenfluktuationen behaftet, wie bereits im Abschnitt über die Quantengravitation erwähnt wurde. Somit löst sich die Vorstellung der im Raume befindlichen Strings auf zugunsten einer abstrakteren Beschreibung. Mathematisch handelt es sich um den Formalismus einer Differentialgeometrie in einem unendlich-dimensionalen „Schleifen-Raum“.

Die Raum-Zeit ist nun zu einem abgeleiteten Konzept geworden. Eine raum-zeitliche Beschreibung ist nur noch in gewissen Situationen möglich, in denen der Grundzustand eine Mannigfaltigkeit beinhaltet, die über gewisse Distanzen ausgedehnt ist. Die Relativierung des Raumbegriffes äußert sich an verschiedenen Stellen der String-Theorie.

- a) Der Formalismus erlaubt eine Ersetzung von raum-zeit-artigen Variablen x^μ durch andere fermionische Freiheitsgrade ψ^i , ohne den physikalischen Inhalt zu ändern.
- b) Im symmetrischsten Zustand des String-Feldes ist die Metrik $g_{\mu\nu} = 0$. Dies entspricht keiner Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit. In einem Zustand, der einen physikalischen Raum beschreibt, ist die Symmetrie gebrochen.
- c) Es gibt einen kleinsten Abstand. Eine erweiterte Unschärfe-Beziehung für Ortsunschärfen Δx lautet

$$\Delta x = \frac{\hbar c}{E} + \frac{GE}{g^2 c^5},$$

wobei E die aufgewandte Energie und die übrigen Größen Konstanten sind. Der erste Beitrag ist konventionell, während der zweite ein spezifischer String-Effekt ist. Δx besitzt ein Minimum von der Größe der Planck'schen Länge, unterhalb derer der Abstands begriff nicht mehr sinnvoll verwendet werden kann.

Der Raum, der sonst als Grundelement in physikalische Theorien einzugehen pflegte, ist in der String-Theorie sekundär geworden. Was aber ist primär? Diese Frage scheint von einer begrifflichen Klärung noch weit entfernt zu sein.

III. ERKENNTNISTHEORETISCHE PROBLEME

Die gegenseitige Beziehung von Erkenntnistheorie und Wissenschaft ist von merkwürdiger Art. Sie sind aufeinander angewiesen. Erkenntnistheorie ohne Kontakt mit der Wissenschaft wird zum leeren Schema. Wissenschaft ohne Erkenntnistheorie ist – soweit überhaupt denkbar – primitiv und verworren.

*Albert Einstein*²

III.1. Raumbegriff

Geometrie kommt nicht der Arithmetik, die rein apriorisch ist, sondern der Mechanik gleich.

*C. F. Gauß*³

Die Wandlung des Raumbegriffes und der Art, wie er in die Theorien eingeht, habe ich in den letzten Abschnitten versucht zu schildern. Dabei läßt sich eine zunehmende Abstraktion feststellen. Ausgehend vom Minkowski-Raum, der sich unmittelbar an den Anschauungsraum und die zeitliche Entwicklung anlehnt, fand eine Erweiterung auf gekrümmte Räume höherer Dimension statt. Die quantisierte Gravitationstheorie verlangt eine radikale Neubestimmung, welche die Quantenfluktuationen der Geometrie berücksichtigt. Und schließlich wurde der Raum in der String-Theorie zu einem sekundären, abgeleiteten Konzept, das nur in gewissen Situationen sinnvoll ist.

Diese Wandlung sollte interessante Anregungen für eine erkenntnistheoretische Diskussion des Raumbegriffes in physikalischen Theorien und seiner Beziehung zum Anschauungsraum liefern können.

III.2. Ontologische Fragen

Bei der Betrachtung des Standardmodells der Elementarteilchen stellt sich die Frage nach der Existenz von quarks, wie ich weiter oben bereits erwähnte. In einem mehr erkenntnistheoretischen Kontext hat sich dazu Frau von Falkenburg geäußert. In gleicher Weise stellt sich angesichts der weiteren genannten Theorien die Frage nach der Existenz höherer Dimensionen, Strings etc..

Bei genauerer Betrachtung scheint es mir, daß diese Fragen nicht nach phänomenologischen Kriterien allein sinnvoll beantwortet werden können. Stattdessen gilt es vielmehr, eine Bestimmung des Begriffes der Existenz im Zusammenhang mit den verwendeten Theorien vorzunehmen. Die Bemerkung Einsteins zu Heisenberg: „Die Theorie bestimmt, was beobachtbar ist.“ zielt in diese Richtung, nimmt aber besonderen Bezug auf das Kriterium der Beobachtbarkeit. Die Einstellung Quines zu diesen ontologischen Fragestellungen scheint mir besonders beachtenswert: „Die Frage nach der Existenz von Dingen muß im Zusammenhang mit einer

²in: P. A. Schilpp (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, Stuttgart 1955, S. 507

³Brief an Olbers, 1817

Theorie gestellt werden, und zwar nicht nach dem Kriterium der unmittelbaren Beobachtbarkeit, sondern nach Kriterien wie z.B. der Einfachheit der Beschreibung.“⁴

Eine nähere Untersuchung dieser Problematik vor dem Hintergrund der neueren Entwicklungen in der Physik wäre sicherlich angebracht.

III.3. Methodologische Aspekte

Wenn ihr von den theoretischen Physikern etwas lernen wollt über die von ihnen benutzten Methoden, so schlage ich euch vor, am Grundsatz festzuhalten: Höret nicht auf ihre Worte, sondern haltet euch an ihre Taten!

*A. Einstein*⁵

Die Entwicklung der theoretischen Modelle in der Physik bietet eine Fülle von Material zu der Frage: Welche Kriterien werden zur Bewertung von Theorien herangezogen? Nach Popper⁶ kann man vier Arten von Kriterien, nämlich interne, zwischentheoretische, metatheoretische und empirische, unterscheiden. Ich möchte diese anhand der genannten physikalischen Theorien illustrieren.

1. Interne Kriterien

Hierzu zählt die Konsistenz der Theorie. Dieses Kriterium hat in Form der Forderungen nach Anomaliefreiheit und Renormierbarkeit bzw. Endlichkeit eine erhebliche Rolle bei der Auswahl der betrachteten Theorien gespielt. Als zweites ist die Einfachheit der Theorie zu nennen. Diese findet oft ihren Ausdruck in Symmetrien. In vielen Fällen weisen die fundamentalen Gesetze der Theorien Symmetrien auf, die eine einfache Gestalt der Grundgleichungen erlauben, während diese Symmetrien bei den realisierten Zuständen spontan gebrochen und damit nicht unmittelbar offenbar sind. Diese Dichotomie ist analog zu derjenigen zwischen Naturgesetzen und kontingenten Elementen der Theorie.

2. Zwischentheoretische Kriterien

Als Beispiel hierzu wäre die teilweise Vereinigung von Elementarteilchenphysik und Kosmologie zu nennen. Das heißt, daß diese in einigen Bereichen heute wesentlichen Bezug aufeinander nehmen, und von den Erkenntnissen des jeweils anderen Gebietes Gebrauch machen.

3. Metatheoretische Kriterien

Das ausgesprochene Ziel der erwähnten Theorien, nämlich die Einheit der Physik, ist metatheoretischer Natur. Es geht darum, nach einheitlichen Formprinzipien zu suchen. Die dabei implizit gemachte Grundannahme ist diejenige, daß es eine entsprechende Struktur der Natur gibt, die solche Formprinzipien erlaubt.

Ein Gesichtspunkt, auf den Herr Stöckler hingewiesen hat, ist die mit der Einheit der Physik einhergehende Entfernung vom Alltagsverständnis: „Die Durchführung des Einheitsprogrammes

⁴W. V. O. Quine: *The ways of paradox and other essays*, 1976

⁵A. Einstein: *Mein Weltbild*, 1977

⁶K. Popper: *Logik der Forschung*, 1971

ist nur möglich, wenn man die Beobachtungssprache verläßt und theoretische Begriffe einführt und wenn man sich von den physikalischen Alltagserfahrungen entfernt.“⁷

4. Empirische Kriterien

Die vorzügliche Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse der Elementarteilchenphysik mit den Vorhersagen des Standard-Modells ist der hauptsächliche Grund dafür, daß sich das Standard-Modell bei den theoretischen Physikern durchgesetzt hat. Der Erfolg renormierbarer Quantenfeldtheorien ist in diesem Falle nach empirischen Kriterien bemessen. Die Kehrseite der Medaille ist, daß es nicht die geringsten empirischen Hinweise auf vereinheitlichte Theorien oder andere Ansätze gibt, die über das Standard-Modell hinausgehen. Andererseits sind Vorhersagen solcher Theorien, insbesondere der String-Theorie, die sich heute empirisch prüfen ließen, sehr erwünscht, leider aber schwierig zu bekommen. Diese Gründe haben dazu geführt, daß empirische Kriterien bei der Suche nach vereinheitlichten Theorien zurückgetreten sind. Es ist aber zu betonen, daß dies nicht einen prinzipiellen Wandel der Einstellung bedeutet. Das angestrebte Ziel ist nach wie vor, empirisch prüfbare Aussagen zu gewinnen.

Ich möchte schließen mit dem Ausdruck der Hoffnung, daß der Satz Friedrich von Schillers zu den Naturforschern und Philosophen seiner Zeit: „Feindschaft sei zwischen euch, noch kommt das Bündnis zu frühe“ heute keine Gültigkeit mehr besitzt.

⁷M. Stöckler: Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik, 1984